

İletişim Hatalarına Maruz Kalan İki Yönlü Teleoperasyon Sisteminin Geliştirilmiş Kuvvet Takibi Performanslı Model-Aracılı Denetimi

Emre Uzunoğlu, Mehmet İsmet Can Dede

Makina Mühendisliği Bölümü
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Urla, İzmir

emreuzunoglu@iyte.edu.tr, candede@iyte.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada iki yönlü teleoperasyonda iletişim hatalarından kaynaklanan kararsızlık ve çalışılan ortama fazla kuvvet aktarımı problemlerini gidermek amacıyla model-aracılı teleoperasyon ve paralel konum/kuvvet denetimleri ile bir denetim algoritması oluşturulmuştur. Model-aracılı tekniğin kullanımı üç serbestlik dereceli sistem için genelleştirilmiş ve yerel denetleyicide empedans (impedance) denetimi algoritması entegre edilmiştir. Sunulan denetim metodu deneysel olarak, masaüstü haptik cihazlarını teleoperasyon sisteminde ana (master) ve bağımlı (slave) sistemler olarak kullanılması ile test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile oluşturulan denetimin iletişim hatalarında iki yönlü teleoperasyon sisteminin kararlılığının, pasifliğinin ve konum/kuvvet izleminin performansının korunduğunu görülmüştür.

1. Giriş

Teleoperasyon sistemleri operatörün güvenli ve uzak mesafelerden otonom sistemlerin gerçekleştiremeyeceği derecede karmaşık görevlerin gerçekleştirilmesini sağlar. Sualtında ve uzayda gerçekleştirilen veya radyoaktif materyaller gibi tehlikeli materyallerin kullanıldığı operasyonlar teleoperasyon uygulamaları için tipik örnekler olarak verilebilir. Teleoperasyon sistemlerinde sistem genellikle ana ve bağımlı olmak üzere iki alt sisteme ayrılır. Operatör uzaktaki ortamda (bağımlı cihazın operasyonu gerçekleştirdiği ortam) bulunmaksızın, ana sistem arayüzü üzerinden, bağımlı sisteme komutlar gönderir ve bağımlı sistem operasyonu gerçekleştirir [1]. İki yönlü teleoperasyonda, operatöre operasyonu başarılı bir şekilde gerçekleştirmesi için ek olarak ana sistem üzerinden haptik geri beslemesi (dokunma duyusu geri beslemesi) sağlanır. Sistemler arasında iletilen sinyaller hız (dolayısıyla hareket komutu), kuvvet veya iki yönlü teleoperasyon da her ikisinin de bilgilerini içerebilir. İki kanallı olarak adlandırılan sistemler, ana ve bağımlı sistem arasında sadece iki sinyalin iletiildiği sistemleri tanımlar. Dört kanallı teleoperasyon ise hem kuvvet hem de hareket bilgilerinin iki tarafa da iletiildiği sistemleri tanımlar [2]. Bu durumlardaki amaç, görevini başarı ile gerçekleştirmesi için ana sistem üzerinden operatöre bağımlı sistemin çalıştığı ortamda çalışıyor hissiyatı yaratmaktır ve arttırmaktır. Buna uzakta varolma hissiyatı (telepresence) denir. Kısaca iki yönlü teleoperasyon sistemleri, yani bağımlı sistemde ölçülen dış etki kuvvetlerinin de ana

sisteme iletiildiği sistemler, operatörün uzakta gerçekleştirilen karmaşık manipülasyonları başarı ile gerçekleştirebilmesi için haptik geri beslemeden yararlanırlar [3, 4].

Teleoperasyon denetimlerinin tasarımı, iki sistem arasındaki iletişim gecikmeleri ve kopukluklarından dolayı, birbiri ile çelişen sistemin kararlılığı ve performansı kriterleri arasında dengeleme gerektirir. İki yönlü teleoperasyonlarda görülen ve zaman gecikmelerinden kaynaklanan kararsızlık problemi, 1960'ların ortalarında bir sorun olarak tanımlanmıştır [5]. İlk çalışmalardan itibaren basit manipülasyon deneyleri ile iletişim gecikmelerinin operatörün performansı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir [6]. Genel olarak iletişim gecikmelerinden kaynaklanan kararsızlıklar kuvvet geribildirimini kullanan iki yönlü teleoperasyon sistemlerinde önemli sorunlardan biri olarak kabul edilmektedir ve bu sorunu çözmek için farklı denetim algoritmaları geliştirilmiştir. Bunlardan ilki komut ver ve bekle metodudur. Kullanılan ikinci bir metod, hibrit bir denetim metodu olan operatörün üst seviye komutları gönderdiği ve ikincil komutların uzaktaki sistemin kendi denetim döngüsü ile gerçekleştirdiği, yönetsel yada üst seviye denetimdir [7]. Bir diğer uygulanan metod ise operatörün sistemin cevabını gerçekleştirmeden önce gözlemleyebilmesi ve olası hataları engelleyebilmesini sağlayan tahmin bazlı/gözlem-bazlı denetimdir. Bu yöntemlerin dışında pasiflik esaslı denetimlerin ve konum/kuvvet denetleyicilerin geliştirilmesi iki yönlü teleoperasyon denetimlerinde ve bu denetimlerin iletişim gecikmelerine karşı kararlılığının sağlanabilmesinde büyük etkide bulunmuştur [3, 8, 9].

Son yıllarda, iletişim gecikmesi ve kopukluğu olan bir teleoperasyon sisteminin performansının iyileştirilmesi için Mitra and Niemeyer [10] tarafından model-aracılı denetim metodu geliştirilmiştir. Bu metotta operatör tarafında bulunan ana sistem tanımı içinde bağımlı sistemin çalıştığı uzaktaki ortamın basitleştirilmiş bir modeli yer almaktadır. Operatör komutları bu model üzerinden bağımlı sisteme iletilmektedir. Söz konusu sanal model gerçekleştirilen görev ve kullanılan algılayıcılardan alınan veriler dahilinde yaratılmaktadır. Ana sistem vasıtasıyla operatör tarafından iletilen komutlar bağımlı sisteme aktarılırken eş zamanlı olarak bağımlı sistem algılayıcı verileri kullanılarak bağımlı sistem ortamının basitleştirilmiş bir modelini oluşturmak için ana sisteme güncellemeler iletilir. Bu metotta, bağımlı sistemden konum/kuvvet bilgilerinin iletilmesi yerine bağımlı sistem ortamının basitleştirilmiş bir modeli hakkında bilgiler iletilmektedir. Dolayısıyla operatör ana sistem arayüzü (haptik ana sistem) iletişim hatalarından

dolayı oluşabilecek kararsızlıklardan bağımsız olarak uzaktan varolma hissiyatı ile çalışır. Mitra ve Niemeyer'in sabit zaman gecikmeleri ile yaptığı testlerde de görüldüğü gibi bu yöntem ile sistemler arasında iletilen bilginin yükünü düşürürken teleoperasyon sisteminin bant genişliğini artırmaktadır. Sonuç olarak, bu yöntemle iletişim kanallarındaki sabit zaman gecikmelerinden kaynaklanabilecek kararsızlığının azaltıldığı bildirilmiştir [10, 11].

Paralel konum/kuvvet denetleyicileri kuvvet geri beslemesini de denetimde algoritmasında kullanarak özellikle bulunduğu ortam ile fiziksel teması olan çalışmalarda daha güvenli ve başarılı bir denetim sağlamaktadır. Paralel konum/kuvvet denetleyicilerinde ölçülen kuvvet bilgilerinin kullanıldığı denetim döngüsü konum denetimine paralel olarak kullanılmaktadır. Empedans denetimi, admitans denetimi, hibrit paralel konum/kuvvet denetimi ve bu metodların modifiye edilmiş versiyonları da dahil olmak üzere birçok paralel konum/kuvvet denetimi algoritması geliştirilmiştir. Bu denetim algoritmalarının uygulama alanlarından bir tanesi de iki yönlü teleoperasyon sistemleridir. İki yönlü teleoperasyon sistemlerinde bağımlı sistemin çalıştığı ortamdaki belirsizlikler (ortandaki nesnelere sertlikleri ve konumları gibi) genellikle sistemde, özellikle ilk temas anında, kararsızlık problemleri yaratmaktadır. Söz konusu sorunların çözülmesi için empedans denetimleri [12, 13], konum/kuvvet denetim teknikleri, gürbüz empedans denetim algoritmaları [14], hibrit konum/kuvvet empedans denetimleri [15], uyumlu (adaptive) empedans denetimi [16], uyumlu admitans denetimi [17], ve tahim-esaslı empedans denetimleri [18] geliştirilmiştir. Teleoperasyon sistemlerinde bu denetim metodlarının uygulanmasındaki esas amaç, ana ve bağımlı sistemler arasında olabildiğince iyi bir performans ile konum dışında kuvvet izleniminin de gerçekleştirilmesidir.

Bu çalışmanın amacı bağımlı sistemde bir paralel konum/kuvvet denetleyicisinin entegre edildiği, model-aracılı teleoperasyon metodu ile bir denetim algoritması geliştirmek ve deneysel testlerini iletişim hataları oluşurken gerçekleştirmektir. Çalışmada geliştirilen denetim yönteminin doğrulaması ve işlevselliği, teleoperasyon sisteminin kararlılığının ve performansının sanal olarak yaratılan iletişim hatalarının varlığında gözlemlenmesi ile ölçülmüştür. Bunun için bağımlı sistemin yerel denetiminde paralel konum/kuvvet deneticisi (empedans denetimi) kullanılmış, model-aracılı teleoperasyon algoritmasını kullanan üç serbestlik dereceli ve iletişim hatalarının yaşandığı bir durum için teleoperasyon denetimi geliştirilmiş, Novint Falcon ve Sensable Phantom Haptic Desktop haptik cihazları kullanarak oluşturulan teleoperasyon sistemi ile deneyler gerçekleştirilmiştir.

Bir sonraki bölümde modifiye edilmiş model-esaslı teleoperasyonun, yerel ve ana sistemin denetimleri ve model yaratımı anlatılmıştır. Üçüncü bölümde ise deneysel düzenek ve bunu izleyen bölümde deney sonuçları verilmektedir. En son bölüm ise deney sonuçları ve oluşturulan denetim üzerinde yapılan tartışmalar ve varılan sonuçlar için ayrılmıştır.

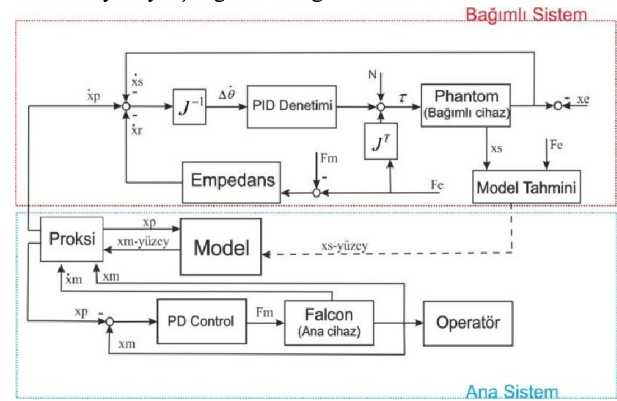
2. Denetim Algoritması

2.1. Denetim Yapısı

Bu çalışmada kullanılan denetim yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir. Genel olarak teleoperasyon sistemlerinde olduğu gibi, denetim yapısı bağımlı ve ana olmak üzere iki alt sisteme ayrılmıştır. Bu sistemler ve aralarındaki ilişkiler Şekil

1'de gözlemlenebilir. Bağımlı sistemdeki yerel denetleyici hareket iç döngüsü PID tipi denetleyici olan empedans denetimi kullanılmaktadır. Hareket iç döngüsünde bağımsız eklem denetimi yapılmaktadır ve Coriolis ve merkezkaç kuvvetleri bozucu etken olarak alınması suretiyle sadece yerçekimi kuvvetleri (N) doğrusal olmayan etkenlerin devreden çıkarılması için denetime eklenmiştir. Bu denetleyicide, görev uzayında komutlar ana sistemden iletilen temsilci (Proxy) hareketleri (\dot{x}_p), ölçülen bağımlı hareketleri (\dot{x}_s) ve ölçülen kuvvete göre empedans terimi ortamla temasa uyum gösterme amaçlı hareketler (\dot{x}_r) ile hesaplanmaktadır. Empedans denetimin esas kullanılma amacı bağımlı sistemde ilk temaslarda yaşanabilecek hasarlardan korunmak ve bağımlı sistemin uzaktaki ye uyumlu çalışmasını sağlamaktır.

Çalışmada temas kuvvetleri hakkındaki bilgiler, alışılmış olduğu gibi kuvvet algılayıcıları kullanmak yerine, önceden hesaplanmış tepki kuvvetleri tahmini verileri yardımıyla bağımlı sistemin içinde elde edilir. Bunu sağlamak amacı ile bağımlı cihazın çalışma alanı küçük parçalara bölünerek uç noktasının her ayrı parça içinde konumlandırılması için gerekli tor değerlerinden oluşturulan konuma bağlı veri seti oluşturulmuştur. Bağımlı sistem çalışırken bulunduğu konumda bu verileri kıyas olarak sistemin dinamiğine bağlı olarak tepki kuvvetlerini (F_e) hesaplar. Bunun sonucunda hesaplanmış tepki kuvvetleri empedans denetimine kuvvet algılayıcısı çıktısı olarak ger beslenir. Ayrıca, hesaplanan tepki kuvvetleri, cihazın ilk defa temas ettiği bir yüzeyde bu yüzeyin konum (x_s -yüzey) bilgilerini oluşturmada ve ana sistemde bağımlı sistem ortamının modelinin güncellenmesinde kullanılmaktadır. Modeli oluşturmak için bağımlı sistemin temas haline geçildiği andaki konum bilgisi kullanılarak temas edilen nesnenin yüzeyi için gerekli bilgi edinilir.



Şekil 1: Model-aracılı teleoperasyon denetim yapısı.

Temas edilen ortamın empedansları (ortamdaki yüzeylerin sertlikleri gibi) da bağımlı sistem tarafından ölçülebilir veya hesaplanabilir. Fakat bu çalışmada çevresel empedansların modelde yaratımı kullanılmamıştır. Ayrıca çalışmada ana ve bağımlı cihaz arasında bilgi iletimleri, cihazların kinematik yapıları farklı olduğu için, görev uzayında tanımlanmıştır.

Ana sistem tanımı içinde bağımlı sistemi temsil etmek üzere kendi dinamikleri ile bağımlı sistemin temsilcisi (proxy) yaratılır. Temsilci ana sistem içinde yaratılan bağımlı sistem ortamının basitleştirilmiş modeli ile etkileşim içindedir. Temsilcinin hareketleri, bağımlı sisteme komut olarak aktarılır ve bağımlı sistemin yerel denetleyicisinde kullanılır. Temsilci ana sistemde sistemin pasifliğini sağlamak amacı ile bazı kısıtlamalar altında ana cihazın (operatörün kullandığı haptik

cihaz) hareket isteklerini izlemekte ve ana sistemin taleplerini temsilci hareketleri ile (\dot{x}_p) bağımlı sisteme iletmektedir. Dinamik temsilcinin ve sanal modelin yaratımı, ana cihazla dolayısı ile operatöre, iletişim gecikmeleri, iletişim kayıpları veya ortamın bilinmezliklerden oluşabilecek fazladan kuvvet aktarımlarını engellemede kullanılmaktadır [10].

2.2. Ana Sistem Denetimi

Ana sistem içinde temsilci bağımlı sistemin vekili olarak çalışmaktadır. Temsilci operatör tarafından verilen hareket komutlarını sanal olarak oluşturulan dinamiği ile modelin kısıtlamaları içinde Mitra and Niemeyer [10] çalışmasında önerdiği gibi takip etmektedir. Temsilcinin dinamik davranışı temsilci hızının (v_p) (1) denklemi ile oluşturulmasıyla sağlanır.

$$v_p = v_m + (k_{pm} / k_{dm})(x_m - x_p) \quad (1)$$

Denklem (1)'de v_m ana sistemin hızı, x_m ana sistemin konumu, k_{pm} ve k_{dm} denetim parametrelerini temsil eder. Temsilci hareketi (v_p) [10]'da önerildiği gibi her zaman modelin kısıtlamaları içinde çalışmaktadır. Bu çalışmada kısıtlama temsilcinin çalışma alanının model içindeki yüzeylerin konumu ile kısıtlanması ile oluşturulmuştur. Bu durumda temsilcinin konumunun asla oluşturulan yüzeyin altında olmaması garantilenir. Bu özellik ana cihaz vasıtasıyla operatöre yüzeye temas edildiğinde kuvvet geri beslemesinin oluşturulmasında kullanılmaktadır.

Kuvvet (F_m) PD parametreleri ile ana sistemde (2) denklemi ile temsilci ve ana sistemin konumları arasındaki hata ile yaratılır. Bu durumda yüzeye temas halinde temsilci sanal yüzey ile kısıtlandığı için oluşan konum farkı ile operatöre kuvvet aktarılmaktadır. Bu çalışmada operatöre iletilen kuvvetler önceden yaratılmış tahminsel parametreler ile hesaplanmaktadır.

$$F_m = k_{pm}(x_p - x_m) + k_{dm}(v_p - v_m) \quad (2)$$

Model-aracılı metotta önerildiği üzere temsilci ağırlıksız olduğu ve oluşturulan modelde yüzeylerin içine girmesi (penetre etmesi) algoritmada engellediği için sistemde enerji depolanmaz. Böylece dinamik temsilci oluşturulması ile sistemin pasifliği sağlanmış olur [10, 19].

2.3. Bağımlı Sistem Denetimi

Bağımlı sistemin denetimi eklem uzayında empedans denetimcisi ile gerçekleştirilmektedir. Bağımlı sistemin eklem motorlarını sürmek için oluşturulan tork gereksinimleri, τ , oransal k_{ps} , türev k_{ds} , ve integral k_{is} denetim parametreleri ile (3) denklemi ile ve doğrusal olmayan etkilerin giderilmesi için kullanılan N terimi ile hesaplanmaktadır. Hata değişkeni e (4) denklemde ifade edildiği gibi v_p (temsilciden iletilen hareket isteği), v_s (bağımlı cihazın uç noktasının ölçülen hareketi), v_r (hedef empedans kullanılarak hesaplanan hareket modifikasyonu), ve Jakob matrisinin tersi kullanılarak eklem uzayında hesaplanmaktadır.

$$\tau = k_{ps}(e) + k_{ds}(\dot{e}) + k_{is}(\int e) + N \quad (3)$$

$$e = J^{-1} \cdot (v_p - v_s - v_r) \quad (4)$$

Algoritmada paralel konum/kuvvet denetimleri için ikinci dereceden empedans terimi kullanılmıştır. Dolayısı ile sanal olarak kütle-damper-yay elementleri ile yaratılan empedans terimi (Z) (5) denklemde gösterildiği gibi hareket modifikasyonu v_r teriminin hesaplanmasında kullanılmıştır. İkinci dereceden empedans terimi (6) denklemde yay K , kütle M ve damper B parametreleri ile oluşturulmuştur.

$$F/v_r = Z \quad (5)$$

$$Z(s) = Ms + B + K/s \quad (6)$$

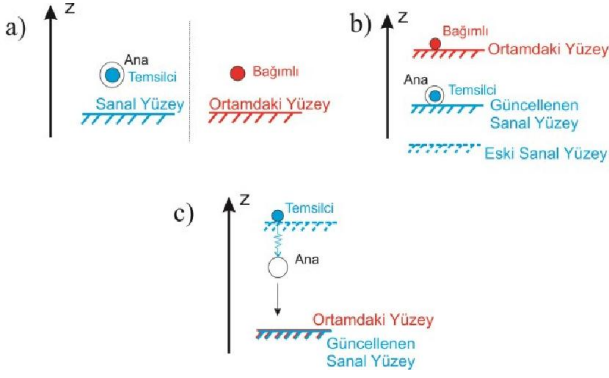
Ana sistemde temas kuvvetleri temsilci ve ana sistemde yaratılan model üzerinden operatöre iletilir. Operatörün hissettiği, operatöre modelde gerçekleşen temaslar sonucu uygulanan kuvvetler, bağımlı sisteme de iletilip bağımlı cihazın operatörün uyguladığı kuvvetleri temas ettiği ortama aktarmasında kullanılır. Bu metod algoritmada hem konum hem de kuvvet izlenimini sağlar. Eğer çalışma sırasında hiçbir temas yok ise denetim algoritması sadece konum denetimi olarak çalışır. Kuvvet denetimi sadece çarpmalar ve temaslarda devreye girer. Eksi işaretli ana sistem kuvvet isteklerinin kuvvet okumalarını değiştirip ana sistemden iletilen kuvvetin ortama uygulanması Şekil 1'de bağımlı sistemin empedans terimi girişinde gösterilmiştir.

2.4 Model Yaratımı ve Güncellemeleri

Çalışmada model güncellemeleri, bağımlı sistem tarafında ortamla temas sonucunda oluşan/hesaplanan tepki kuvvetleri ve uç noktası konum ölçümleri sayesinde elde edilen, ortamdaki nesnelerin görev uzayındaki yüzeyleri hakkında bilgilerden oluşmaktadır.

Model yaratımı için bağımlı cihazın çalışma alanı x-, y- ve z-eksenlerinde parçalara ayrılmıştır. Böylece herhangi bir eksen yönünde parçalara ait yükseklik bilgileri diğer iki eksene bağlı olarak yaratılır. Bağımlı cihazın ortamla temasa geçtiği bilgisi daha önceden bahsi geçen kuvvet ölçme/hesaplama yöntemi ve belirli bir yönde cihazın uç noktasının hızının sıfırlanması bilgisi kullanılarak oluşturulur. Algoritmada bağımlı sistemde ortam ile temasın gerçekleştiği tahmini olarak hesaplandığında, konum bilgileri ana sisteme modelin oluşturulması ve güncellenmesi için iletilir. Söz konusu güncellemeler ancak bağımlı sistem, ortamda farklı bir yüzeye veya konumu değişen bir yüzeye temas ettiğinde oluşturulur. Böylece bağımlı sistemden gelen bildirimler doğrudan denetim metoduna kıyasla daha az sıklıkla iletilmekte ve gecikmelerden kaynaklanacak pasifsizliği bozucu etkenler engellenmektedir.

Temsilci, oluşturulan modelin kısıtlamaları (x_m -yüzey) içinde hareket ederken bir yandan model güncellemeleri alınmakta ve modelde dinamik olarak uygulanmaktadır. Bu çalışmada model güncellemeleri yüzey tanımlama, yok etme ve nesnenin kaydırılması şeklinde uygulanmıştır. Şekil 2a'da gösterildiği gibi temsilci, sanal olarak yaratılan modelin kısıtlamaları içinde (sanal yüzeylerin içinden geçemeyecek şekilde) ana cihazı takip ederken, bağımlı cihaz kendi ortamında gerçek yüzeylerle gecikmeli olarak çalışmaktadır.



Şekil 2: a) Modelde yüzey tanımlama. b) Modelde yüzey kaydırma. c) Modelde yüzey yok etme.

Şekil 2b'de yüzey kaydırıldığı, ortamda bulunan yüzeyin önceden bulunduğu yerden daha yüksek bir seviyede ölçüldüğü, durum gösterilmiştir. Bu durumda, ortamdaki yüzeyin konum bilgisi, (eski) sanal yüzeyin üzerinde olduğu için, güncellenen sanal yüzey temsilcinin konumunun hemen altında yaratılır. Güncellenen yüzey bağımlı ortamdaki yüzeyin konumuna gelene kadar güncellemeler bu şekilde ana sisteme aktarılır. Sanal yüzey ortamdaki yüzeyin konumuna geldiğinde artık sabitlenir ve yüzey modelde yaratılmış olur. Bu kısıtlama ana cihaz üzerinden model güncellemelerinde operatöre fazladan kuvvet aktarımlarını engellenmesini sağlar.

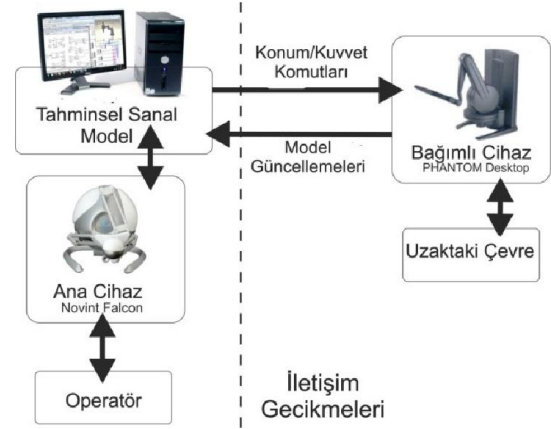
Yüzeyin yok edildiği yani yeni güncellemede ortamdaki yüzeyin daha aşağıda ölçüldüğü durum ise Şekil 2c'de gösterilmiştir. Bu durumda güncellenen sanal yüzey ortamdaki yüzeyin konumunda yaratılır. Böylece temsilci, ana sistem denetiminde belirtildiği üzere, yaratılan temsilci dinamiği ile aşamalı olarak ana cihazın konumuna gelir. Bağımlı, komutları temsilci aracılığı ile aldığı için, güncelleme anında ana cihazın konumunu yakalamayı bir anda gerçekleştirmez ve bu konuma belli bir hata ile aşamalı olarak gelir. Böylece güncellemeler sırasında, bağımlı sistemde oluşabilecek salınımlı hareketler ve beklenmeyen çarpışmalar engellenir.

3. Deney Düzenegi

Denetim çalışmalarının deneyleri ana ve bağımlı cihazlardan, sanal model, bağımlı ve ana sistem denetimleri ve model-aracılı algoritmadan oluşan teleoperasyon sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te resim edildiği gibi, ana sistemde 3 serbestlik dereceli paralel mekanizmalı bir haptik masaüstü cihazı olan Novint Falcon ana cihaz, ve bağımlı sistemde ise seri mekanizmaya sahip olan Phantom Desktop bağımlı cihaz olarak kullanılmıştır. Algoritmanın uygulamaları ve gerçek zamanlı deneyler Real-Time Windows Target ile MATLAB© Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir.

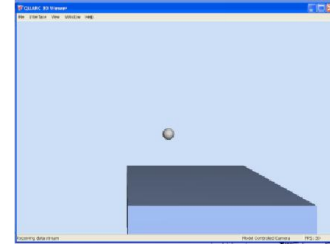
Haptik cihazların denetiminin uygulanmasında programlama arayüzü olarak MATLAB© Simulink ortamında üçüncü bir kuruluş ürünü olan QuaRC© yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım, gerçek zamanla senkronize şekilde cihazlarda bulunan algılayıcı bilgilerini okuyan ve eyletici komutlarını ileten blokları içermektedir. Her iki cihazın eyleticilerine komutlar eklem uzayında veya görev uzayında, kullanılan blokların içinde yer alan mekanizmaların kinematik

hesaplamaları kullanılarak iletebilmektedir. Bağımlı cihaz için eyletici komutları eklem uzayında gönderilmekte iken ana cihazda eyletici komutları görev uzayında iletilmektedir.



Şekil 3: Deneysel teleoperasyon düzeneği.

Ana sistemde, model-aracılı yöntem ile tahminsel olarak oluşturulan model, testler sırasında görsel olarak operatöre uzakta bulunan ortamın basitleştirilmiş 3 boyutlu modeli olarak oluşturulmuştur. Söz konusu sanal görsel geri besleme QuaRC© blokları ile program içerisinde sanal gerçeklik görüntüsü olarak oluşturulmaktadır. Deneyler boyunca basitleştirilmiş modeli gerçek zamanlı olarak operatöre sanal gerçeklik modeli ile sunulmuştur. Örnek olarak Şekil 4'te uzak ortamda bulunan dikdörtgenler prizması şeklinde bir nesnenin ve bağımlı cihazın uç noktasının küre şeklinde temsili ile oluşturulan 3 boyutlu modelleri gösterilebilir.



Şekil 4: Temsili olarak oluşturulan sanal modelin görseli.

Denetim parametrelerinin seçimi aşağıda belirtilen seviyelerde testler için iterasyon ile gerçekleştirilmiştir.

- Yerel denetimciler
- Temsilci dinamikleri yaratımı
- Sanal model yaratımı
- İletişim hataları entegrasyonu

Empedans denetiminde bağımlı sistemde kuvvet geribeslemesi için kuvvet algılayıcısı yerine önceki bölümde de belirtildiği gibi eklem motorlarının tork gereksinimlerinin bağımlı cihazın dinamikleri ile karşılaştırılarak oluşturulmuş veri setinden yaratılmaktadır. Böylece çarpma algılama algoritması ve buna bağlı olarak model güncellemeleri oluşturulmuştur.

İletişim hataları sabit ve değişken iletişim gecikmeleri ve iletişim kayıpları olarak modellenmiş ve teleoperasyon sisteminin pasifliğini ve performansını test etmek için testlerde sisteme uygulanmıştır.

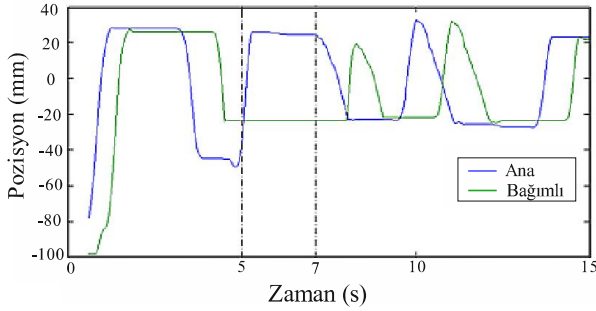
4. Test Sonuçları

Bu çalışmada, bağımlı cihazın çalışma alanında ilk defa karşılaştığı fiziksel bir yüzey ile çarpışması ve bu çarpışma sonunda tanımlanan model ile etkileşimlerini içeren bir senaryo test edilmiştir. Testte fiziksel bir nesne, test başladıktan sonra cihazın çalışma alanına yerleştirilmiş ve etkileşimleri gözlemlenmiştir.

Testler boyunca operatöre sanal model görsel geribeslemesi, sanal cihazın temsilsel uç noktası ve ilk temas sonucunda tanımlanan nesnenin yüzeyleri olarak oluşturulmuştur. Böylece operatörün algısı çalıştığı temsilcinin görsel yaratımı ile artırılmıştır.

4.1. İletişim Hataları Testi

İletişim kopukluklarının uygulandığı testte ayrıca iletişim gecikmesi de 0.4 ve 1.3 saniye arasında değişken olarak sisteme sunulmuştur. Sistem beşinci ve yedinci saniyeler arasında iletişim kaybına maruz kalmıştır. Test sonuçları Şekil 5'te ana cihazın uç noktasının ve bağımlı cihazın uç noktasının z-ekseninde zamana bağlı konum değişimi olarak gösterilmiştir. Bu örnekte nesnenin z-eksenindeki yüzeyi ile bağımlı cihazın ana cihazdan iletilen komutlar doğrultusunda etkileşimleri incelenmektedir.

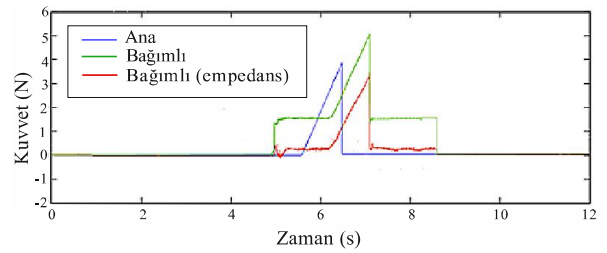


Şekil 5: Değişken zaman gecikmesi ve iletişim hatalarında konum takibi.

Şekil 5'te görülebileceği gibi ilk çalıştırmadan itibaren bağımlı cihazın gecikme ile ana cihazdan iletilen konum komutlarını izlediği görülmektedir. Bağımlı cihaz ilk inişte (eksi z-ekseni yönündeki hareketinde), nesne çalışma alanına yeni konulduğunda, -20 mm'de bulunan nesnenin yüzeyi ile temas haline geçer. Bu çarpışma sonucu elde edilen temas yüzeyinin konum bilgisi gecikme ile model güncellemesi olarak model-aracılı yöntem kullanılarak ana sisteme aktarılır. 5 ve 7'inci saniyede yaratılan iletişim kopukluğu hatası sonucu bağımlı sistem 8'inci saniyeye kadar konumunu korur ve bilgi tekrar iletmeye başladığında hareketine devam eder. 8'inci saniyeden sonra gerçekleşen temaslarda nesnenin yüzeyinin konum bilgisi ile ana sistemde nesnenin haptik geribildirimini yaratılır. Böylece operatör, yaratılan basitleştirilmiş sanal modelde nesnenin yüzeyi ile olan teması temsilci aracılığı ile gözlemlemekte ve temasta oluşan kuvvetleri hissetmektedir. Şekil 5'te oluşturulan model sayesinde operatörün hareketlerinin z-ekseninde tanımlanan yüzey konumu ile sınırlandırıldığı ve bağımlı sistemin ana sistemdeki sanal model ile etkileşimler sonucunda gecikme ile ana cihaz hareketlerini takip ettiği gözlemlenmektedir.

4.2. Empedans Denetimi Testi

Empedans denetiminin etkisini gösterebilmek için iletişim gecikmesi ile teleoperasyon sisteminin empedans denetimi ve empedans denetimi olmadan sadece hareket denetimi ile gösterdiği tepkiler sunulmuştur. Bu örnekte bağımlı sistem, ana sistemin komutlarını 0.7 saniye sabit bir gecikme ile izlemektedir. Şekil 6'da ana sistem tarafından uygulanan kuvvet ve bağımlı sistemin empedans ve empedans denetimi olmadan aynı komuta göre kuvvet takibi gösterilmiştir. 5'inci saniyede bağımlı sistem fiziksel yüzeye çarpar ve gecikme ile bu yüzeyin konum bilgisi ana sisteme aktarılır. Ana sistemde modelin içinde sanal yüzey yaratılarak operatörün bu yüzey ile etkileşimleri gecikme ile bağımlı sistemine aktarılır. 5'inci ve 9'uncu saniyeler arasında ana sistemden iletilen konum istekleri doğrultusunda bağımlı cihaz uzak ortamdaki nesnenin yüzeyi ile temasını sürdürmektedir.



Şekil 6: Ana sistem ile bağımlı sistem ve empedans denetimi kullanılan bağımlı sistemin kuvvet izlenimi sonuçları.

Empedans denetimi olmadan elde edilen sonuçta yüzeyle temas halinde iken bağımlı cihazın nesneye nispeten daha fazla kuvvet uyguladığı görülmektedir. Empedans denetiminin kullanılmadığı senaryoda, bağımlı sistemin ortama uyguladığı kuvvet bağımlı cihaza zarar vermemek amacıyla 2 N ile sınırlandırılmıştır. Ana sistemde model güncellemesi gerçekleştiikten sonra kullanıcı tarafından yaratılan sanal yüzeye karşı uygulanan kuvvet bağımlı sisteme aktarılır. Bağımlı sistemde bu kuvvetin ortamdaki nesneye uygulanması için her bir ekleme uygulanması gereken tork değerleri hesaplanır ve bağımlı cihazın hareketi için eklem uzayında hesaplanan tork değerlerine eklenir.

Empedans denetiminde ortama bağımlı cihaz tarafından uygulanması istenen kuvvetler ölçülen kuvvetlerden çıkarılmak suretiyle ölçülen kuvvet değeri modifiye edilir. Bu şekilde tekrar hesaplanan kuvvet geribildirimini, empedans terimi kullanılarak, bağımlı cihazın yapması beklenen hareketi modifiye eder. Empedans denetimi ile gerçekleştirilen testin sonuçlarında ilk çarpışma ile yüzeye uygulanan kuvvetin olabildiğince sönümlendirildiği ve ortama uyum sağlandığı görülmüştür. Yine de ilk temas halinde empedans denetiminde de başlangıçta bir salınım gözlemlenmiştir. Bahsi geçen sönümlenme performansı empedans teriminin parametrelerinin değiştirilmesi ile iyileştirilebilir. Ayrıca empedans denetimi olmadan yapılan testin sonuçları ile karşılaştırıldığında kuvvet izlenim performansının da arttırıldığı görülmektedir.

5. Sonuç

Bu çalışmada model-aracılı teleoperasyon metodu iletişim hatalarına maruz kalan bir teleoperasyon sistemine uygulanmıştır. Oluşturulan algoritma, masasüstü haptik cihazları ile oluşturulan teleoperasyon sistemi kullanılarak gerçek zamanlı testler ile sınanmıştır.

İletişim hatalarından kaynaklanabilecek kararsızlıkların giderilmesi dışında bağımlı cihazın özellikle ortama ilk temasında büyük kuvvetlerin oluşmasını engellemek amacı ile empedans denetimi bağımlı cihazın yerel denetleyicisi olarak sıranmıştır. İlk temas sırasında empedans denetiminde çalışan sistemde ortaya çıkan kuvvetler empedans denetimi olmayan çalışma ile kıyaslanmıştır.

İletişim hatalarından kaynaklanabilecek kararsızlıklardan dolayı oluşabilecek zararlardan korunmak için model-aracılı yöntem uygulanmıştır. Değişken iletişim gecikmesine ve kaybına maruz bırakılarak gerçekleştirilen testlerden konum takibi sonuçları elde edilmiştir.

Değişken zaman gecikmelerinin ve bilgi kayıplarının yaşandığı durumda teleoperasyon denetim sisteminin kararlılığını koruduğu ve gecikme ile ana sistemden iletilen komutları güvenli bir şekilde (ortama en az kuvvet ileterek) gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak bağımlı cihazda kullanılan empedans denetiminin bağımlı cihazın özellikle ortamda bilinmeyen nesnelere etkileşimde uygulayabileceği kuvvetlerin azaltılması empedans denetimi olmayan çalışmaya göre sağlamıştır. Empedans denetiminde kuvvet izleniminde belirli bir hata ile ana cihazdan iletilen kuvvet isteği izlenmektedir. Bunun bir sebebinin kuvvet algılayıcısının kullanılmaması ve oluşan kuvvetlerin önceden elde edilen veriler doğrultusunda bağımlı cihazın tork isteklerinin kıyaslanması ile hesaplanması olduğu değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada model-aracılı metodun, özellikle bağımlı sistemin içinde çalıştığı ortamın kısıtlarının (ortamdaki nesnelere yerleri veya şekillerinin) sık olarak değişmediği durumlarda, sistemin pasifliğinin iletişim hatalarına rağmen korunduğu ve operasyonun performansının geliştirildiği gözlemlenmiştir. Özellikle empedans denetimi ile model-aracılı metodunun birlikte kullanılması ile daha güvenli bir teleoperasyon sistemi geliştirilebileceği görülmüştür. İlerideki çalışmalarda kuvvet algılayıcısı ve gelişmiş konumlandırma algılayıcıları (kamera bilgisi) ile daha karmaşık operasyonlar için model-aracılı metodun kullanıldığı iki yönlü teleoperasyon sistemi geliştirilmesi planlanmaktadır. Söz konusu algılayıcılar uzaktaki ortam hakkında daha detaylı bilgi edinimi ve dolayısı ile ana sistem içerisinde uzaktaki ortamın daha detaylı bir modelinin oluşturulmasında ve iletişim hatasına maruz kalan karmaşık görevlerin gerçekleştirilmesinde kullanılması planlanmaktadır.

Kaynakça

- [1] J. Cui, S. Tosunoglu, R. Roberts, C. Moore ve D. W. Repperger, "A Review of Teleoperation System Control," Proceedings of the Florida Conference on Recent Advances in Robotics, 2003.
- [2] M.I.C. Dede, ve S. Tosunoglu, "Parallel Position/Force Controller for Teleoperation Systems with Time Delays," The 5th IFAC Workshop on Technology Transfer in Developing Countries: Automation in Infrastructure Creation, DECOM-TT, Izmir, Turkey, May 2007.
- [3] G. Niemeyer ve J.J.E. Slotine, "Telematuration with Time Delays," The International Journal of Robotics Research, Cilt: 23, s:873, 2004.
- [4] H. Flemmer, "Control Design ve Performance Analysis of Force Reflective Teleoperators - A Passivity Based Approach. Department of Machine Design," Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, 2004.
- [5] J. Vertut ve P.Coiffet, "Teleoperation and Robotics Evolution and Development. Robot Technology," Cilt: 3A, 1985.
- [6] W. R. Ferrell, "Remote Manipulative Control With Transmission Delay," IEEE Transactions on Human Factors in Electronics, Cilt: 6, s: 24-32, 1965.
- [7] W. R. Ferrell ve T. B. Sheridan. 1967. "Supervisory Control of Remote Manipulation," IEEE Spectrum, s: 81-88.
- [8] D.A. Lawrence, "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation," IEEE Trans. Robot. Automat., Cilt: 9, No: 15, s:624-637, 1993.
- [9] G. Niemeyer ve J.J.E. Slotine, "Stable Adaptive Teleoperation," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Cilt: 16, No: 11, s:152-162, 1991.
- [10] P. Mitra ve G. Niemeyer, "Model-mediated Telematuration," The International Journal of Robotics Research, Cilt: 27, s:253, 2008.
- [11] D. Gentry ve G. Niemeyer, "User Perception and Preference in Model Mediated Telematuration," EuroHaptics Conference, and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, World Haptics 2007, s:268 - 273, 2007.
- [12] N. Hogan, "Impedance control: an approach to manipulation-Part I: Theory; Part II: Implementation; Part III: Applications," Trans. ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control, Cilt:107, No:1, s:124, 1985.
- [13] H. Kazerooni, T. B. Sheridan ve P. K. Houpt, "Robust Compliant Motion For Manipulators-Part I: The Fundamental Concepts Of Compliant Motion; Part II: Design Method," IEEE J. Robotics and Automation, Cilt:2, No:2, s:83-105, 1986.
- [14] Z. Lu and A. A. Goldenberg, "Robust Impedance Control and Force Regulation: Theory and Experiments," International Journal of Robotics Research, Cilt:14, s:225-254, 1995.
- [15] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Asymptotic Stability For Force Reflecting Teleoperators With Time Delay," Proceedings Of The IEEE International Conference on Robotics and Automation, s:1618-1625, 1989.
- [16] H. Park and J. Lee, "Adaptive Impedance Control of a Haptic Interface," Mechatronics, Cilt:14, No. 3, s:237-253, 2004.
- [17] H. Seraji, "Adaptive Admittance Control: An Approach to Explicit Force Control in Compliant Motion," in Proc. IEEE Conf. Robotics & Automation, San Diego, CA, s:2705-2712, 1994
- [18] M.C. Chien ve A.C. Huang. 2004, "Adaptive Impedance Control of Robot Manipulators Based on Function Approximation Technique," Robotica, Cilt:22, No:4, 2004.
- [19] P. Mitra ve G. Niemeyer, "Dynamic Proxy Objects in Haptic Simulations," Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics Singapore, 1-3 December, 2004